

(6) 集成材を利用した座屈拘束鋼板ブレースの実験的研究

清水 啓介¹・田口 孝²・近藤 龍哉³・加藤 三晴⁴

¹正会員 矢作建設工業（株） エンジニアリングセンター（〒480-1342 愛知県長久手市茨ヶ廻間 1533-74）

E-mail: k-shimizu@yahoo.co.jp

²正会員 矢作建設工業（株） エンジニアリングセンター（〒480-1342 愛知県長久手市茨ヶ廻間 1533-74）

E-mail: t-taguchi@yahoo.co.jp

³正会員 工学院大学 建築学部建築学科 准教授（〒192-0015 東京都八王子市中野町 2665-1）

E-mail: kondotatuya@hanno.jp

⁴正会員 ガル建築コンサルタント事務所（〒473-0914 愛知県豊田市若林東町三和 8-1）

E-mail: mitu-kato@tg.commufa.jp

ブレース材は、地震時に建物に強度と剛性を持たせる有効な構造部材であるが、圧縮力が作用したときに座屈が発生するという欠点を有する。そこで、集成材を利用した新しい座屈拘束鋼板ブレースを提案した。提案したブレース材は、鋼板の弱軸方向に二つの集成材（拘束材）を、鋼板を挟み込むように設置し、その集成材同士をボルトによって一体化したものである。

本ブレース材の構造性能を確認するため、約 1/2 スケールの試験体に対する静的繰返し実験を実施した。実験の結果、有効な実験変数を選択した試験体では、引張側、圧縮側ともに鋼板の降伏耐力に達し、座屈拘束ブレースとしての性能を有していることが確認された。ただし、拘束材に木質材料を用いたことによる集成材のせん断、曲げ、めり込み破壊といった特有な破壊状況も確認されたため、それらに対する検討も必要であることが確認された。

Key Words: buckling-restrained braces, steel plate, glued laminated timber, statical cyclic loading test

1. はじめに

ブレース材は、地震に対して有効に作用するように建物に強度と剛性を持たせる部材であるが、圧縮力が作用したときに座屈が発生するという欠点がある。そこで、木質の構造材料である集成材を利用した新しい座屈拘束鋼板ブレースを提案する。これは、平成 22 年に「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律」が施行されたことに加え、近年の環境負荷の低い建設技術の要求や、国産木材の安定供給・流通の促進といった趨勢を受け、提案したものである。

本論では、提案する集成材を用いた座屈拘束鋼板ブレースの概要を示すとともに、その有効性および構造性能を確認するために実施した、およそ 1/2 スケールの試験体に対する静的繰返し試験の概要および結果を示す。さらに、実験で見知した局所的な破壊形式に対して検討を

行うとともに、汎用 FEM ソフトによる FEM 解析を実施し、その発生力に対して妥当性の検証を行う。そして、それらによって得られた知見をもとに、今後の開発に向けた課題を示す。

2. 座屈拘束鋼板ブレースの提案と概要

提案する集成材を用いた座屈拘束鋼板ブレース（以下、本ブレース）を図-1 に示す。本ブレースは、鋼板の弱軸方向（板厚方向）に、ラミナの接着方向が直交するように配置された二つの集成材（拘束材）を、鋼板を挟み込むように設置したものである。そして、この集成材同士は、2 次接着やボルトによって一体化させることで、拘束材として必要な剛性と耐力を持たせるものである。ここで、集成材同士をボルトで一体化させる意図は、2

次接着部の長期使用に対する不安の払拭，集成材に乾燥等によるひび割れが発生したとしても，長期に亘って拘束材として必要な剛性や耐力を確保するため，および集成材の割れによって発生する脆性的な破壊を防ぐことを目的としている。

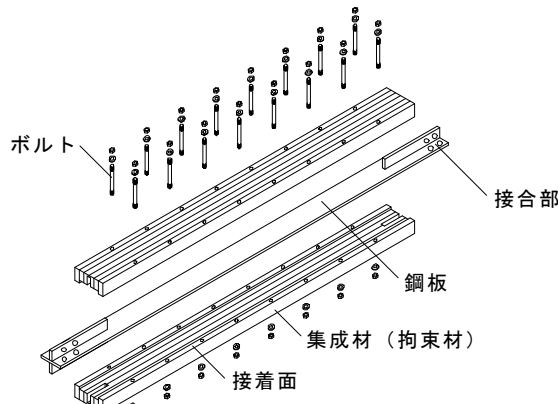


図-1 提案する座屈拘束鋼板ブレース

3. 実験概要

(1) 試験体

本実験の試験体一覧を表-1 に，試験体の形状および寸法を図-2 に，試験体 WB1 の断面を図-3 に示す。

試験体のパラメータとしては，A 部のボルト本数，B，C 部の補強方法，板幅方向の補強の有無，クリアランス量とした。試験体は，およそ 1/2 スケールとし，その拘束材の断面に関しては以下の式^{1,2)}を参考に断面設計を行った。また，試験体では安全側への配慮から，集成材同士の2次接着を行わず，ボルトのみによる接合とした。

$$M^B = \frac{N_{cu}(a + s)}{1 - \frac{N_{cu}}{N_{cr}^B}} \leq M_y^B \quad (1)$$

$$N_{cu} = d\alpha \cdot N_y \quad (2)$$

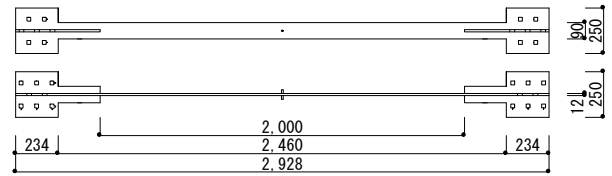
$$N_{cr}^B = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_B}{L_B^2} \quad (3)$$

ここで，

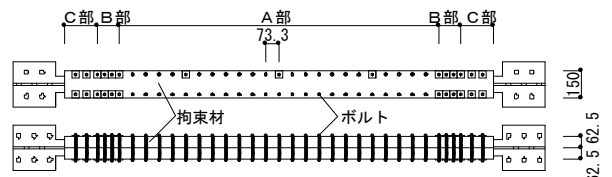
- M^B : 拘束材中央の曲げモーメント
- M_y^B : 拘束材の曲げ降伏耐力
- N_{cu} : 芯材の降伏後最大軸力
- a : 芯材の初期たわみ
- s : 芯材と拘束材の間のクリアランスの合計
- $d\alpha$: 芯材の耐力上昇率 (=1.5)
- N_y : 芯材の降伏軸力
- N_{cr}^B : 拘束材のオイラーの座屈荷重
- E : 拘束材のヤング係数
- I_B : 拘束材の断面二次モーメント
- L_B : 有効座屈長さ (拘束材長さ)

表-1 試験体一覧

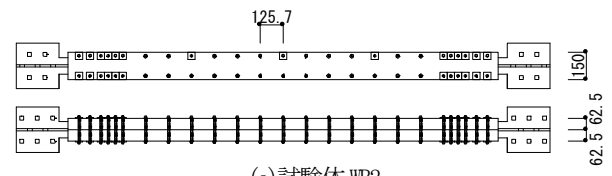
試験体 番号	拘束材 断面	鋼板厚	鋼板幅	ボルト配置(板厚方向)			ボルト配置(板幅方向)			クリア ランス (mm)			
		(mm)	(mm)	A部	B部	C部	A部	B部	C部				
WB1	150 × 62.5 × 2枚	12	90	2列 × 23本	2列 × 4本	2列 × 2本	鋼板補強	2列 × 3本	2列 × 4本	2			
WB2				2列 × 13本	× 2箇所	× 2箇所					鋼板補強	2列 × 3本	× 2箇所
WB3				2列 × 23本									
WB4				2列 × 23本	2列 × 4本	2列 × 2本	鋼板補強	2列 × 3本	× 2箇所				
WB5					× 2箇所	× 2箇所					鋼板補強	2列 × 3本	× 2箇所
WB6					鋼板補強	2列 × 23本			鋼板補強				
WB7						鋼板補強	鋼板補強			鋼板補強	鋼板補強		
										6			



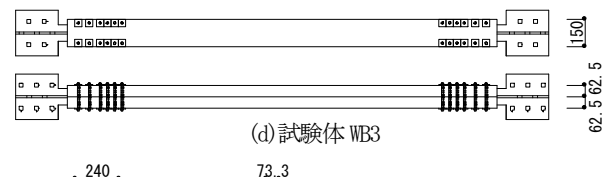
(a) 内部鋼板



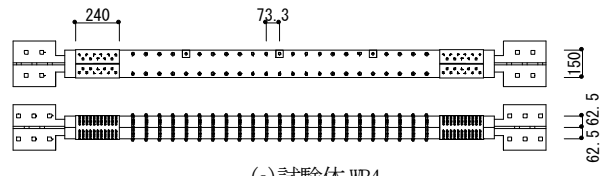
(b) 試験体 WB1



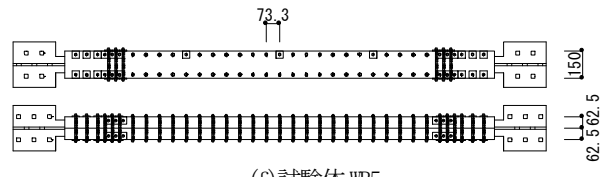
(c) 試験体 WB2



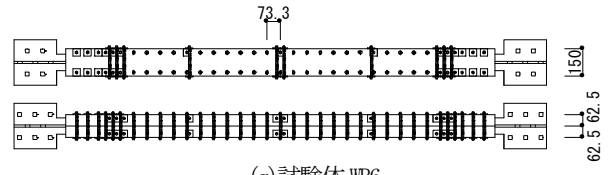
(d) 試験体 WB3



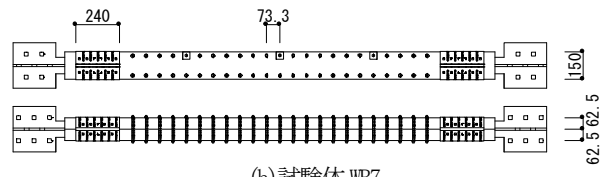
(e) 試験体 WB4



(f) 試験体 WB5



(g) 試験体 WB6



(h) 試験体 WB7

図-2 試験体図

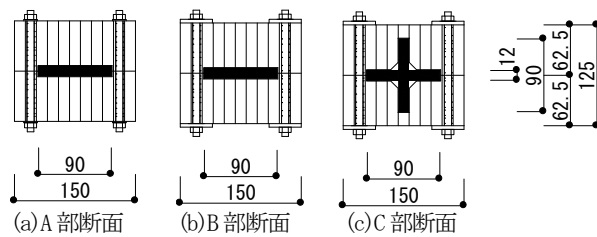


図-3 試験体断面図 (試験体 WB1)

試験体の拘束材の曲げ剛性と曲げ強度の関係を以下の式^{3,4)}を用いて無次元化し、図-4 に示す。なお、今回の検討方法によると、試験体 WB2, WB4, WB5, WB6 に関しては、試験体 WB1 と同じ曲げ剛性と曲げ強度の関係となる。

$$n_E^B = \frac{N_{cr}^B}{N_y} \quad (4)$$

$$m_y^B = \frac{M_y^B}{N_y \cdot L_B} \quad (5)$$

ここで、

n_E^B : 無次元化曲げ剛性

m_y^B : 無次元化曲げ強度

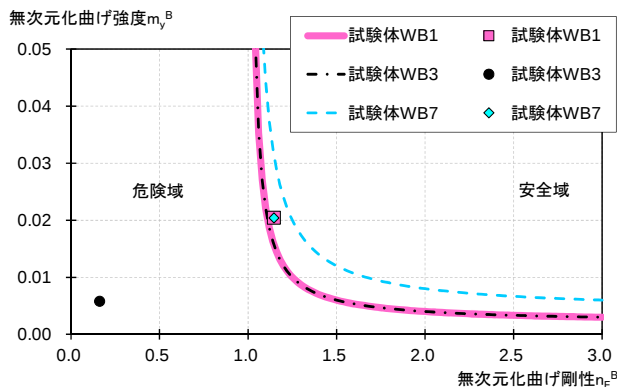


図-4 試験体の曲げ剛性と曲げ強度の関係

この結果、試験体 WB3、試験体 WB7 は危険域 (拘束材が不足) となっており、試験体 WB1 (試験体 WB2, WB4, WB5, WB6 とともに) に関しては辛うじて安全域に含まれている。また、鋼板と集成材の隙間にはテフロンシートを設置するとともに、試験体では集成材同士の2次接着を行わず、ボルトのみによって接合させた。B部のボルト本数は、以下の式^{1,2)}から求める面外への押出力を参考に、A部のボルトは試験体の集成材断面の接合面に発生するせん断力を参考に定めた。

$$P_{rd} = \frac{4(s + v_p \varepsilon_t t_c)}{L_p} N_{cu} \quad (6)$$

ここで、

P_{rd} : 面外への押出力

s : 芯材と拘束材の間のクリアランスの合計

v_p : 塑性時ポアソン比 (=0.5)

ε_t : 最大引張時の塑性軸ひずみ

t_c : 芯材の板厚

L_p : 座屈波長 ($\approx 10 t_c$)

(2) 使用材料

試験体で使用した鋼材および集成材の材料試験結果を表-2 におよび表-3 に示す。鋼材の材料特性は、各鋼材における平均値を採用した。ただし、PL-1.6 に関しては、明確な降伏点を示さなかったことから 0.2%の永久伸びをおこす応力を降伏点とした。集成材の材料特性は、文献 5) の I. 構造用木材の強度試験法の 7 章と 9 章を参考に求め、圧縮試験は 11 体の供試体の平均値、曲げ試験は 6 体の供試体の平均値とした。

表-2 材料試験結果 (鋼材)

鋼材	規格	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	降伏歪 μ	備考
PL-12	SS400	307	452	185	1663	芯材 (全試験体)
PL-3.2		377	462	206	1835	試験体WB4に使用
PL-1.6*	SPHC	335	461	207	1616	試験体WB7に使用
$\phi 9$	SS400	332	450	198	1680	M8ボルト

*: PL-1.6の降伏点は、0.2%の永久歪から求めた

表-3 材料試験結果 (集成材)

集成材	材種	圧縮強度 (N/mm ²)	圧縮 ヤング係数 (kN/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	曲げ ヤング係数 (kN/mm ²)
	カラマツ	48.9	10.8	58.0	10.6

(3) 加力概要

加力装置を図-5 に示す。加力は逆対称加力装置を用い、鉛直ジャッキ 2 本で上部加力梁の水平を保ちながら軸力を載荷する方法とした。水平ジャッキは変位を固定しているため、上下変形によって回転分の水平変形が生じることになるが、今回の実験の範囲では微小量であることから無視した。加力は本ブレースの軸方向に対して、静的正負交番繰返し載荷とし、圧縮側を正載荷とした。

加力サイクルは鋼板の降伏までは荷重制御とし、計算耐力 (降伏荷重) P_y に対し、 $\pm 1/4 P_y$, $\pm 2/4 P_y$, $\pm 3/4 P_y$, $\pm 4/4 P_y$ の 4 段階の荷重を加える。その後は変位制御とし、軸変形量で $\pm 10\text{mm}$, $\pm 20\text{mm}$, $\pm 30\text{mm}$ の変形で、2 サイクルずつの正負繰返しを加えることとした。加力サイクルを表-4 に示す。

表-4 加力サイクル

サイクル	1	2	3	4	5,6	7,8	9,10
荷重制御	$\pm 1/4 P_y$	$\pm 2/4 P_y$	$\pm 3/4 P_y$	$\pm 4/4 P_y$	-	-	-
変位制御	-	-	-	-	$\pm 10\text{mm}$	$\pm 20\text{mm}$	$\pm 30\text{mm}$

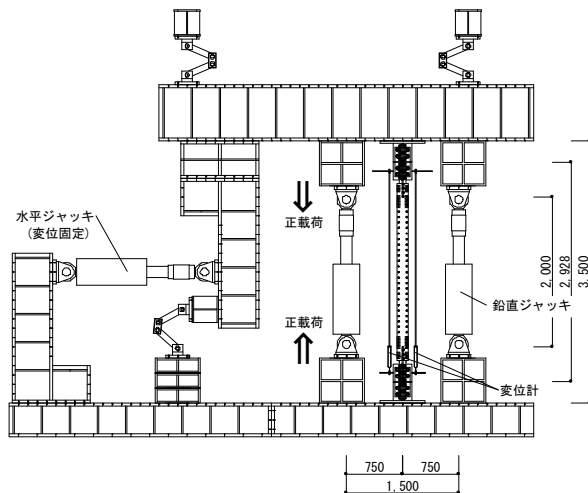


図-5 加力装置

(4) 計測概要

実験では、軸力 P を2基の鉛直ジャッキに取り付けたロードセルの合計にて、軸方向変形 δ を試験体の接合部間に取り付けた2台の高感度変位計の平均にて計測した。また、鋼板の各所および数か所のボルトのひずみ量を貼付したひずみゲージにて計測した。変位計の計測位置を図-5中に、ひずみゲージの計測位置を図-6に示す。

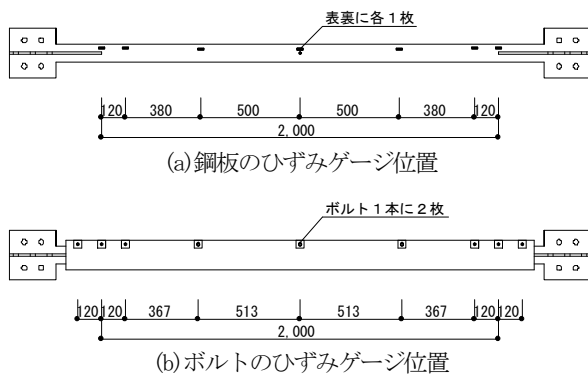


図-6 ひずみゲージ位置

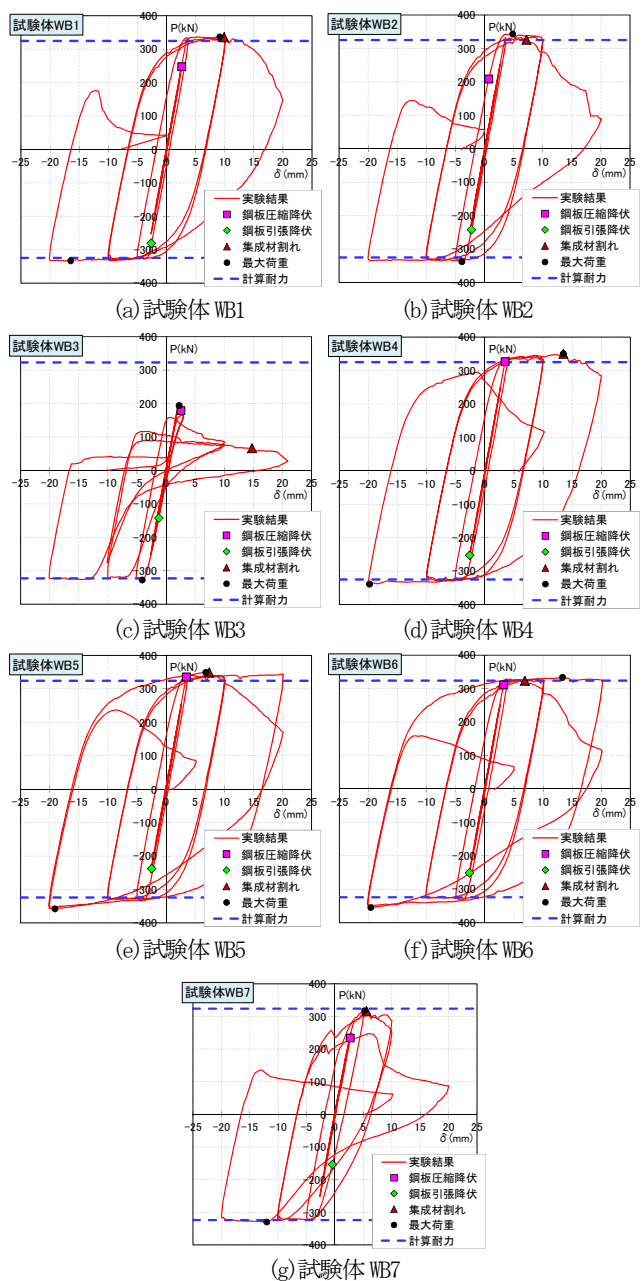


図-7 軸力-軸変形関係

4. 実験結果

(1) 軸力-軸変形関係

各試験体の軸力 P と軸変形 δ の関係を図-7に示す。なお、ここでは圧縮荷重、圧縮変形を正として記載している。また図中には、鋼板の計算耐力（降伏荷重）も示すとともに、鋼板に貼付したひずみゲージのどれか一枚が、最初に降伏ひずみに達した点もプロットしている。また、実験結果一覧を表-5に示す。

試験体 WB1 は+3 サイクル目で鋼板が圧縮降伏、-4 サイクル目で鋼板が引張降伏した。その後、+7 サイクル目の加力中、試験体上部の集成材部分に割れが発生し、急激に荷重が低下した。

表-5 実験結果一覧

試験体 番号	載荷方向	最大荷重		鋼板降伏		計算耐力	最大荷重 ／ 計算耐力
		荷重 (kN)	変形 (mm)	荷重 (kN)	変形 (mm)	荷重 (kN)	
WB1	正	336	9.2	248	2.6	324	1.04
	負	-333	-16.4	-280	-2.6	-324	1.03
WB2	正	343	4.9	209	0.7	325	1.05
	負	-338	-3.9	-242	-2.3	-325	1.04
WB3	正	194	2.3	179	2.6	323	0.60
	負	-328	-4.1	-142	-1.2	-323	1.01
WB4	正	350	13.5	327	3.5	325	1.08
	負	-339	-19.8	-253	-2.6	-325	1.04
WB5	正	349	6.9	336	3.5	324	1.08
	負	-358	-19.1	-237	-2.5	-324	1.10
WB6	正	333	13.4	311	3.2	324	1.03
	負	-355	-19.6	-251	-2.7	-324	1.10
WB7	正	317	5.2	234	2.7	324	0.98
	負	-330	-12.0	-153	-0.5	-324	1.02

試験体 WB2 は-4 サイクル目で鋼板が引張降伏、+5 サイクル目で鋼板が圧縮降伏した。その後、+7 サイクル目の加力中、試験体中央部の集成材部分に割れが発生し、急激に荷重が低下した。

試験体 WB3 は+3 サイクル目で鋼板が圧縮側で降伏，-3 サイクル目で鋼板が引張降伏した．なお，その後，試験体中央部の集成材部分に割れが発生，急激に荷重が低下した．圧縮側では計算耐力に到達しなかった．

試験体 WB4 は-3 サイクル目で鋼板が引張降伏，+4 サイクル目で鋼板が圧縮降伏した．その後，+7 サイクル目の加力中，試験体下部の集成材部分に割れが発生，急激に荷重が低下した．

試験体 WB5 は-3 サイクル目で鋼板が引張降伏，+4 サイクル目で鋼板が圧縮降伏した．その後，+7 サイクル目では耐力低下することがなかったが，繰り返しの+8 サイクル目の加力中，試験体中央下部の集成材部分に割れが発生し，急激に荷重が低下した．

試験体 WB6 は-3 サイクル目で鋼板が引張降伏，+4 サイクル目で鋼板が圧縮降伏した．その後，+7 サイクル目では耐力低下することがなかったが，繰り返しの+8 サイクル目の加力中，試験体中央下部の集成材部分に割れが発生し，急激に荷重が低下した．

試験体 WB7 は+3 サイクル目で鋼板が圧縮降伏，-4 サイクル目で鋼板が引張降伏した．ただし，圧縮側加力時には計算耐力に到達しなかった．その後，+5 サイクル目の加力中，試験体下部の集成材部分に割れが発生，+7 サイクル目の加力中，急激に荷重が低下した．

(2) 損傷状況

実験時終了後の試験体の破壊状況および解体後の鋼板，集成材などの状況を写真-1 に示す．写真の右側が実験時の試験体の上部，左側が下部となっている．また，試験体 WB6 の局部座屈と集成材の破壊状況も併せて示す．



(a) 試験体 WB1 (正面, 右面)



(b) 試験体 WB2 (裏面, 右面)



(c) 試験体 WB3 (裏面, 右面)



(d) 試験体 WB4 (正面, 右面)



(e) 試験体 WB5 (正面, 右面)



(f) 試験体 WB6 (裏面, 右面)



(g) 試験体 WB7 (裏面, 右面)



(h) 試験体 WB6 (破壊部詳細)

写真-1 試験体の最終状況と鋼板の状況

この結果、試験体 WB3 を除く全ての試験体で局部座屈が発生しており、その局部座屈した鋼板が集中的に集成材を押出すことで、その破壊が発生していることが分かる。また、その破壊箇所の近くでは、ボルトのワッシャーがめり込んでいる状況が確認された。こうした破壊は、拘束材に集成材を用いていることによる本ブレース特有のものであると考えられる。

(3) 鋼板、ボルトの発生応力

試験体 WB1、試験体 WB3 および試験体 WB6 において、実験時の正載荷時の各サイクルにおける鋼板に発生した応力を図-8 に示す。ここで、鋼板の応力の値は、実験から得られたひずみゲージによる値および材料試験結果を用いて鋼材の応力-ひずみ関係を完全バイリニアにモデル化して求めたものである。そして、鋼板が圧縮降伏した以降は降伏荷重の値で示している。図の横軸はひずみゲージを貼付した位置に対応しており、図の右側が試験体の上部、左側が下部となっている。

この結果、試験体 WB1 と試験体 WB6 に関しては、サイクルの増加とともに鋼板の内部では一様に応力が増加している結果が得られ、早期に全体座屈した試験体 WB3 では、そうした結果は見られない。こうした結果から、試験体 WB1 や試験体 WB6 で採用した曲げ剛性や曲げ強度を有する拘束材によって、全体座屈が発生するのを防ぎ、鋼板が全体に渡って一様な応力を発生させることができていると考えられ、本ブレースは座屈拘束ブレースとしての最低限の性能を有しているものと考察できる。また、試験体 WB1 や試験体 WB6 の上部では、サイクルの増加とともに表側と裏側の発生応力に差が生じている箇所が見られるが、これは鋼板に曲げ変形が発生しているためと考察される。

次に、試験体 WB1 および試験体 WB6 において、実験時の正載荷時の各サイクルにおけるボルトに発生した応力を図-9 に示す。ここで、ボルトの応力の値は、実験から得られたひずみゲージによる値および材料試験結果を用いてボルト応力-ひずみ関係を完全バイリニアにモデル化して求めたものである。図の横軸はひずみゲージを貼付した位置に対応しており、図の右側が試験体の上部、左側が下部となっている。また、ひずみゲージにて、実験のデータが得られなかった箇所は、図に記載していない。

この結果から試験体 WB1 および WB6 とともにボルトは降伏していないことが確認された。また、+7 サイクルにおいて一部応力が大きくなった箇所、試験体 WB1 では上側中央、試験体 WB6 では下側中央が見られるが、これは写真-1 に見られる鋼板の局部座屈の箇所と対応しており、局部座屈が発生し、拘束材を押出している現象を計測したものと言える。

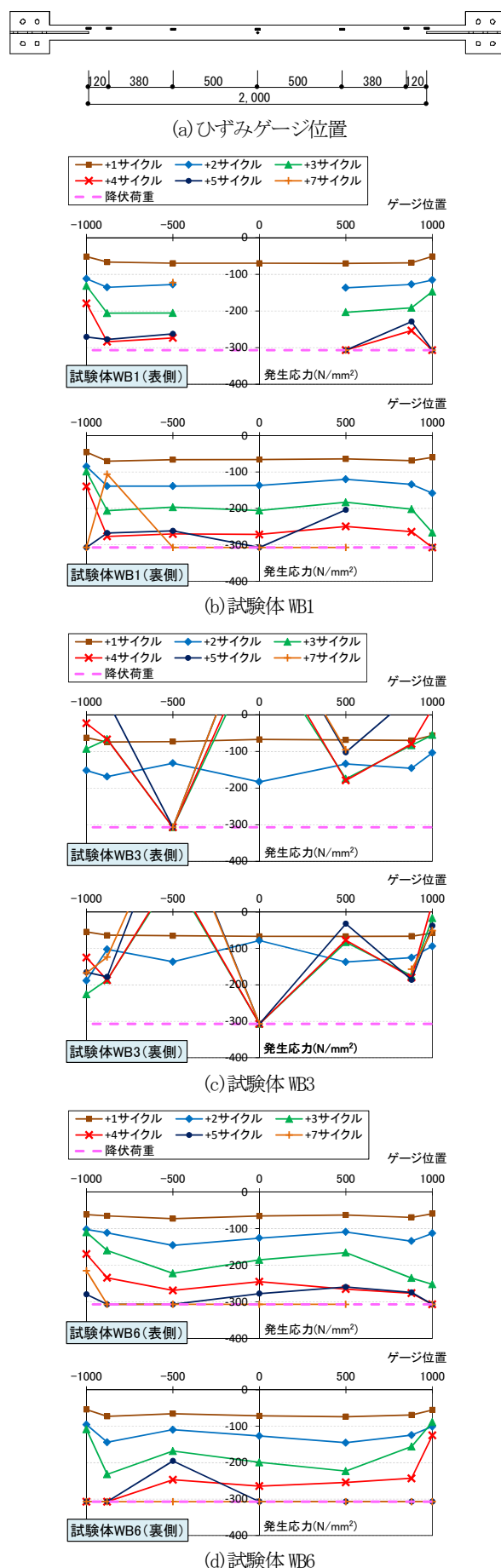


図-8 鋼板の発生応力

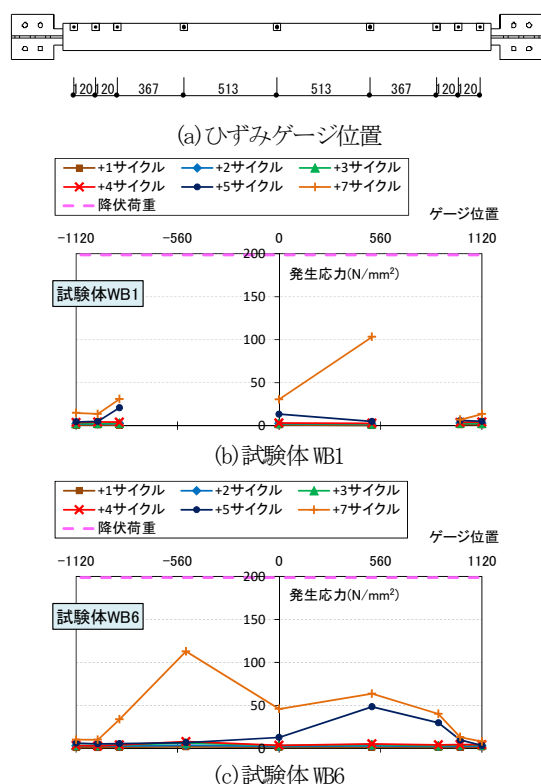


図-9 ボルトの発生応力

(4) 実験結果のまとめ

これらの結果、試験体 WB1, WB2, WB4, WB5, WB6 に関しては、圧縮側の鋼板降伏および計算耐力に達することが確認されるとともに、鋼板にも一様な応力が発生しており、座屈拘束ブレースとしての最低限の性能を有していることが確認された。そのため、拘束材としての集成材の断面に関しては、最低限の曲げ剛性と曲げ強度を有しているものと考察される。その中でも、試験体 WB5, WB6 が最も良い変形性能を示したことから、板幅方向へのボルト設置が性能向上に対して効果のあることが確認された。また、試験体 WB4 に関しては鋼板の座屈波がより高次に移行している傾向も見られ、端部 (B 部) の拘束を強固にすることが有効であることも確認できた。すなわち、プレートによる補強は効果が高いと言える。一方、試験体 WB7 では、板幅方向へのプレート補強を行ったにも係わらず、圧縮側の計算耐力に達しなかったことから、クリアランスの影響が大きいことが確認されるとともに、その管理が如何に重要であるかが分かる。また、試験体 WB1 より A 部のボルトの数を減らした試験体 WB2 の方が変形性能が低く、さらに、A 部にボルトを設置しなかった試験体 WB3 は最も変形性能が低い結果となった。このことから、集成材同士はより強固に固定する方が、変形性能の向上に対して効果が高いことが分かる。

ただし、試験体 WB3, 試験体 WB7 を除いて、他の試験体は全て局部座屈が発生し、その局部座屈によって鋼板が集中的に集成材を押し出すことで、最終破壊状況を引き

起こしている。そのため、本ブレースは式(1)による集成材の断面設計、および式(6)による面外への押出力などの設計に加え、局部的な破壊 (局部崩壊) に対する検討など、拘束材に木質材料 (集成材) を用いていることに対する、特有な検討も必要であると考察される。

5. 考察

(1) 局部的な破壊に関する検討

先述のように、本ブレースでは拘束材である集成材部分において写真-1(h)に見られるような局部的な破壊 (局部崩壊) が生じる結果が得られた。そこで、式(6)により計算される面外押出力に対して、集成材のせん断、曲げやめり込みに対する検討を行う。

式(6)によって算出される面外押出力を表-6 に示す。ここで、発生するせん断力や曲げモーメントは図-10(a), (b) の考え方を用いて算出した。すなわち、せん断破壊面は鋼板が押し出す 2 面を考え、高さは集成材厚さ、幅は鋼板が接触した箇所から 45° で応力が広がると想定し、せん断耐力を定めた。ここで、計算に用いたせん断強度は文献 6) による製材「カラマツ」の基準材料強度を用いた。一方、曲げ破壊は、集成材断面におけるボルト位置を支点と仮定し、鋼板からの押出力を分布荷重として発生モーメントを計算した。曲げ耐力は、文献 7) によると、木材の接線方向や半径方向の曲げ強度は繊維方向の曲げ強度に比べ 10%以下と非常に小さいとの記述があることから、本検討では表-3 に示す曲げ強度の $1/10$ の値を用いて計算した。ここで、式(6)中の L_p は座屈波長であり、文献 1) ではおおむね $L_p \approx 10 t_c$ とされている。めり込み耐力は、文献 2) を参考に図-10(c) に示すようにめり込み幅を t_c と仮定し、めり込み幅と鋼板幅で求まるめり込み面積に、めり込み強度を掛けて計算した。ここで、計算に用いためり込み強度は文献 6) による製材「カラマツ」の基準材料強度を用いた。

一方、写真-2 に見られるように、実験結果では文献 1) で示されるような $L_p \approx 10 t_c = 120\text{mm}$ とする座屈波長までの高次の変形となっていない。写真には一例として、試験体 WB4 と試験体 WB6 を示しているが、これによると、試験体 WB4 では座屈波長が 240mm 程度、試験体 WB6 では 350mm 程度であった。他の試験体 WB1, WB2, WB5, WB7 もおおむね $300 \sim 400\text{mm}$ 程度であった。そこで、実験結果から計測した座屈波長 (240mm , 400mm) を用いて計算した場合も合わせて示す。

表-6 中、検討パターン A は文献 1) に準ずるもの、パターン B は座屈波長を実験結果を参考に 240mm に変更したもの、パターン C は座屈波長を 400mm に変更したもの、パターン D は C に加え、実験では大変形領域までの変形

表-6 局所的な破壊に関する検討

検討 パターン	クリアランス s (mm)	最大引張時の 塑性軸ひずみ ϵ_t (μ)	座屈波長 L_p (mm)	耐力 上昇率 d/α	面外への 押出力 P_{dl} (kN)	集成材の 厚さ t_e (mm)	集成材の 有効幅 b_e (mm)	集成材の せん断強度 F_s (N/mm ²)	集成材の せん断耐力 Q_u (kN)	発生 モーメント M (kN・mm)	集成材の 曲げ強度 $F_b/10$ (N/mm ²)	集成材の 曲げ耐力 M_u (kN・mm)	集成材の めり込み強度 F_c (N/mm ²)	集成材の めり込み耐力 C_u (kN)
A	2	20000	120	1.5	34.5	55.5	55.5	2.1	12.9	560	5.8	165	8.1	8.7
B	2	20000	240	1.5	17.2	55.5	55.5	2.1	12.9	280	5.8	165	8.1	8.7
C	2	20000	400	1.5	10.3	55.5	55.5	2.1	12.9	168	5.8	165	8.1	8.7
D	2	20000	400	1.0	7.0	55.5	55.5	2.1	12.9	114	5.8	165	8.1	8.7

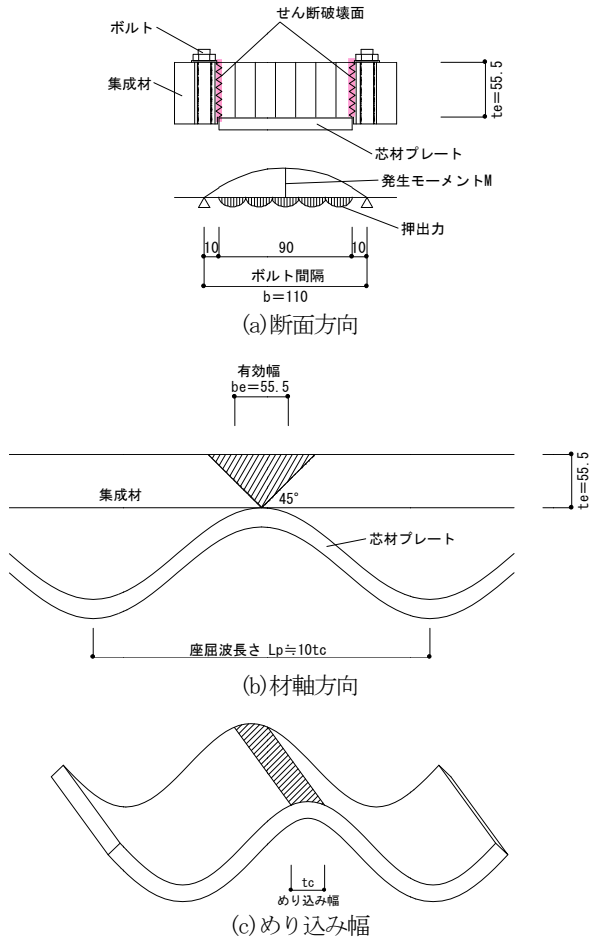


図-10 押出力に対する検討方法



(a) 試験体 WB4

(b) 試験体 WB6

写真-2 試験体の局部座屈

に至っていないと思われることから、鋼板の耐力上昇を考慮せず降伏荷重までとして考えたものである。

この結果、パターン A, B では集成材がせん断破壊、曲げ破壊、めり込み破壊が発生し、パターン C であった場合でも曲げ破壊、めり込み破壊が発生していたことになる。さらに、パターン D であっても曲げ破壊やめり込み破壊に近い押出力が発生していた可能性が高い結果が

得られた。こうした結果から、実験で局所的な破壊が発生した原因としては、全体座屈を防ぐための拘束材の曲げ剛性や曲げ強度が不足していたのではなく、鋼板が局部座屈することで発生した押出力によって、集成材の局部的な曲げ、せん断、めり込みといった耐力が耐え切れなかったものと考察される。

こういった破壊は第 4 章(2)に示した損傷状況と、良い対応していると思われる、これを防止することが今後の課題といえる。

(2) 汎用 FEM 解析による押出力の検討

先述の押出力を考察するべく、汎用の有限要素解析プログラムによる FEM 解析を行った。解析には汎用の有限要素法解析ソフト「ADINA-VERSION9.4」⁸⁾を用いた。解析対象とした試験体は試験体 WB1 と試験体 WB2 であり、FEM 解析モデルを図-11 に示す。

解析モデルとしては、芯材である鋼板および拘束材としての集成材は二次元ソリッド要素でモデル化し、集成材を繋ぐボルトはトラス要素でモデル化した。ここで、鋼板は材軸方向に 112 分割、板幅方向に 2 分割とし、集成材はボルトの配置に合わせて材軸方向は分割し、板幅方向は分割していない。ボルトは、集成材の外側を繋ぐように配置した。境界条件については、鋼板の下部を完全固定とし、上部に軸方向圧縮力を加える形状とした。拘束材の下部は、一端をローラー支持（面外方向変位のみ自由）とし、もう一端は自由に剛体移動するのを防ぐために軽微な弾性バネを加えた。

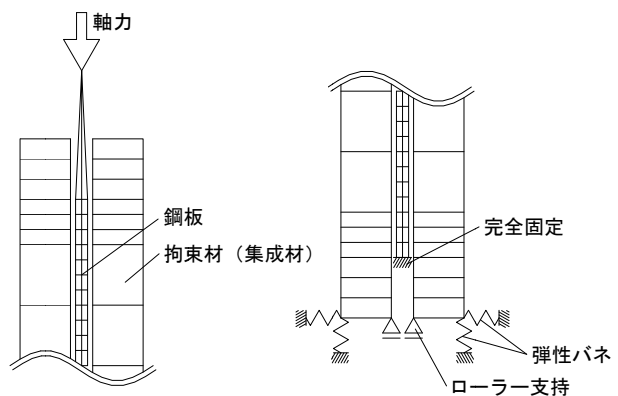


図-11 解析モデル

鋼材は弾塑性のバイリニアモデルとし、表-2 に示す材料試験結果のヤング係数と降伏応力度を用いた。また、バイリニアモデルの二次勾配はヤング係数の 1/100 とし、降伏条件には von Mises の降伏条件を用いた。ボルトと集成材は弾性モデルとし、表-2、表-3 に示す材料試験結果のヤング係数を用いた。また、変形が進み、鋼板と拘束材が接触したとしても、摩擦による応力伝達は無いものとした。さらに、鋼板には、表-6 に示すように座屈波長が 400mm 程度であった実験結果を参考に、全体で 5 波（波長 400mm）となる変形モード（座屈解析より算出）で、最大振幅 1mm となる初期不整を与えた。

加力条件は変形制御とし、軸変形量で±5mm で 1 サイクル、±10mm、±20mm で 2 サイクルずつの正負繰返しを加えることとした。

解析結果における軸力 P と軸変形 δ の関係を図-12 に、+20mm の 1 サイクル目の鋼板の変形状況と拘束材による反力を図-13 および表-7 に示す。

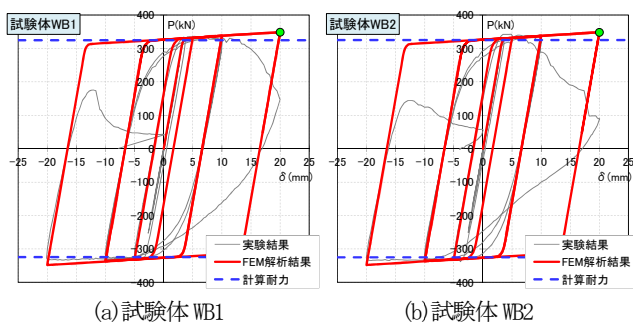


図-12 解析結果（軸力-軸変形関係）

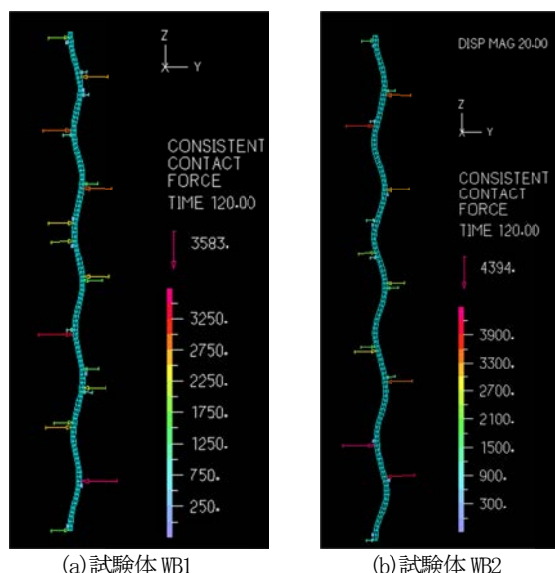


図-13 解析結果（変形と拘束材からの反力）(N)

表-7 解析結果（拘束材による反力）

箇所(上から)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
押出力(kN)	WB1	2.2	4.1	3.6	4.1	4.8	4.2	4.0	4.8	4.3	3.7	1.7
	WB2	1.7	4.9	4.6	3.4	4.6	4.2	4.8	4.9	4.6	4.3	1.1

この結果、軸力-軸変形関係は、集成材が損傷し、荷重が低下する箇所を除き、剛性・耐力ともに実験結果と比較的良好な対応を示すことが確認された。また、面外への押出力（拘束材による反力）は、図-12 中に●印で示した繰返し 1 回目の+20mm 変形時（圧縮側）において、試験体 WB1 で最大 4.8kN、試験体 WB2 で最大 4.9kN といった結果が得られた。今回、汎用ソフトを用いた簡単なモデルによる FEM 解析であったが、表-6 におけるパターン D の結果に対してそれぞれ 68%、70%程度と、少し小さいが比較的近い値が得られた。こうした結果からも、実験においても同様な押出力が作用していた可能性があると考えられ、その力によって集成材が損傷したものと考察できる。

6. まとめ

本論では、集成材を利用した座屈拘束鋼板ブレースを提案し、その構造性能を確認するために静的繰返し実験を実施した。その結果、以下の知見を得た。

- ・集成材を拘束材に利用した座屈拘束ブレースは、適切な実験変数を選択することで、引張側、圧縮側ともに芯材の降伏耐力に達することが確認され、座屈拘束ブレースとしての最低限の性能を有していることが確認された。
- ・拘束材としては、端部を強固にする方が、その変形性能が向上し、有効であることが確認された。さらに、板幅方向に対して補強する方法も有効であることが確認された。
- ・芯材と拘束材のクリアランスの影響は大きく、片側 1mm とした場合には圧縮側でも降伏耐力に達したが、片側 3mm とした場合には、早い段階で集成材が損傷し降伏耐力に達しなかった。
- ・集成材を座屈拘束材に用いたことにより、局部的な破壊が発生する可能性があることが分かり、仮定を立てて考察した結果、集成材の局部的なせん断、曲げ、めり込みによって破壊が発生する可能性があることを示した。
- ・簡単な FEM 解析を実施することで、本論で示した面外への押出力に相当する力が、実験においても作用していた可能性があることを確認した。

本知見は、限られた試験体での結果によって得られたものであることから、現象の解明や設計法の確立に向けては、今後、更なる検討が必要であるといえる。

謝辞：FEM 解析の実施にあたり、矢作建設工業株式会社北川浩氏にご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鋼構造座屈設計指針，pp.73-82，2018.2.
- 2) Toru TAKEUCHI and Akira WADA：Buckling-
Restrained Braces and Applications，pp.11-46，Japan
Society of Seismic Isolation，2017.
- 3) 日本鋼構造協会，鋼材倶楽部：履歴型ダンパー付骨組の
地震応答性状と耐震設計法，pp.69-71，1998.9.
- 4) 井上一朗：建築鋼構造の理論と設計，pp.3-38 - 3-48，京都
大学学術出版会，2003.8.
- 5) 日本住宅・木材技術センター：構造用木材の強度試
験マニュアル，pp.8-15，2011.3.
- 6) 日本建築学会：木質構造設計基準・同解説，pp.395-
405，2006.12.
- 7) 日本建築学会：木質構造部材・接合部の変形と破壊，
pp.38-39，2018.2.
- 8) 榊構造計画研究所：ADINA（バージョン 9.3）理論
とモデル化の手引き日本語版，2013.

(Received August 30, 2019)

EXPERIMENTAL STUDY OF THE BUCKLING-RESTRAINED STEEL-PLATE BRACES USING GLUED LAMINATED TIMBER

Keisuke SHIMIZU, Takashi TAGUCHI, Tatsuya KONDO and Mitsuharu KATO

The brace member is an effective structural member that gives the building strength and stiffness during an earthquake. However, it has the disadvantage that buckling occurs when compressive force is applied. Therefore, we proposed a new buckling-restrained steel-plate brace using glued laminated timber. The proposed brace member is one in which two glued laminated members are installed in the weak axis direction of the steel plate and integrated by bolts.

In this paper, in order to confirm the structural performance of this brace member, a static experiment was conducted on a test specimen of about 1/2 scale. As a result of the experiment, in the specimen for which effective experimental parameters were selected, the steel plate yielded on both the tension side and the compression side. Therefore, it was confirmed that it has the performance as a buckling restrained brace. However, in the experiment, a peculiar failure mode due to the use of wood material as the restraining material was confirmed. For this reason, we studied a peculiar failure mode.

As a result of this study, it was found that the proposed new buckling-restrained brace is effective, and that a specific study is necessary.